

مدلسازی رفتار تنش - کرنش خاکهای رسی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

سیدمحسن حائری*، ناصر ساداتی* و رضا مهین روستا**

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۷۸/۷/۲۴ - دریافت نسخه نهایی: ۸۰/۹/۱۰)

چکیده: در این مقاله رفتار خاکهای رسی تحت آزمایش سه‌محوری با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی^۱ مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا مدل‌هایی تهیه شد تا رفتار تنش - کرنش رسها را در شرایط زهکشی نشده پیش‌بینی کند. مزیت مدل‌های تهیه شده در این است که پارامترهای ساده‌ای نظیر مشخصات فیزیکی خاک همچون حدود اتربرگ، رطوبت خاک، درصد ریزدانه و غیره برای مدل کردن رفتار تنش کرنش خاکهای رسی در آزمایش سه‌محوری به کار گرفته شده است، بدون آنکه به انجام آزمایشات وقتگیر و دقیق سه‌محوری نیاز باشد. نتایج مدل به کار گرفته شده نشان می‌دهد که شبکه عصبی یک ابزار مناسب برای مدلسازی رفتار تنش - کرنش خاکهای رسی با استفاده از مشخصات ساده فیزیکی این خاکهاست.

واژگان کلیدی: خاک رس، آزمایش سه‌محوری زهکشی نشده، شبکه عصبی مصنوعی، تنش-کرنش، فشار آب حفره‌ای، مقاومت برشی

Modelling of Stress-Strain Behaviour of Clayey Soils Using Artificial Neural Network

S. M. Haeri, N. Sadati and R. Mahin-Rousta

Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology
Department of Electrical Engineering, Sharif University of Technology

Abstract: In this research, behaviour of clayey soils under triaxial loading is studied using Neural Network. The models have been prepared to predict the stress-strain behaviour of remolded clays under undrained condition. The advantage of the model developed is that simple parameters such as physical characteristics of soils like water content, fine content, Atterberg limits and so on, are used to model the stress-strain behaviour of clays under triaxial loading, without performing exact and time-consuming tests on samples.

Results from the network show that neural network is a good tool for prediction of stress-strain behaviour of clayey soils using simple physical characteristics of such soils.

Keywords: Clay, Undrained, Triaxial Test, Artificial Neural Network, Stress-Strain, Pore water Pressure, Shear Strength.

** - دانشجوی دکترا

* - دانشیار

رفتار خاک در برابر نیروهای اعمال شده و عوامل مؤثر در آن، توسط مدل‌های رفتاری تبیین می‌شود. مدلسازی مصالح خاکی به دلیل رفتار غیرخطی و پیچیده‌ای که دارند مشکل است. به طور معمول، برای مدلسازی رفتار تنش - کرنش خاک، از مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود. گرچه اکثر مدل‌های ریاضی، نیاز به پارامترهای زیادی دارند که به دست آوردن آنها از نتایج آزمایشگاهی متداول امکانپذیر است از طرفی، رفتار مکانیکی خاکهای رسی به عوامل مختلفی مانند فشار همه‌جانبه، ترکیب کانیهای رس، میزان پیش تحکیمی، نسبت تخلخل، درصد رطوبت، حدود اتربرگ و ... بستگی دارد که اثر اغلب این پارامترها، در مدل‌های ریاضی در نظر گرفته نمی‌شود.

نوع دیگر مدلسازی رفتاری برای مصالح، استفاده از سیستم‌های هوشمند است. یکی از این سیستم‌ها، شبکه‌های عصبی مصنوعی است که دارای یک سری ورودی و خروجی است. اولین کارها برای مدلسازی با این روشها توسط قابوسی و همکاران [۱] بر روی بتن انجام شده است. آنها در بارگذاری یکنواخت روی بتن، تنش و کرنش و افزایش تنش را به عنوان ورودی به کار بردند و افزایش کرنش در گام بعدی را به دست آوردند. پنومادو^۲ و همکاران [۲] با استفاده از مدل شبکه عصبی، اثر نرخ کرنش را در رفتار تنش - کرنش نوعی خاک رسی بررسی کردند. ایس^۳ و همکاران [۳] از مدل شبکه عصبی برای پیش بینی رفتار خاک ماسه‌ای در بارگذاری یکنواخت و تناوبی استفاده کردند. در مدل ایشان اثر تنش همه‌جانبه، دانسیته نسبی و فشار پیش تحکیمی در منحنیهای تنش - کرنش بررسی شده است.

در این مقاله، از شبکه‌های عصبی چند لایه^۴، برای پیش بینی منحنیهای تنش - کرنش نوعی خاک رسی استفاده شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی، ابزاری قوی برای تعیین روابط غیرخطی بین ورودیها و خروجیهاست و کاربرد آن بیشتر در حل مسائلی است که قانون و رابطه پارامتری مشخصی بین ورودیها و خروجیها وجود ندارد.

اطلاعات لازم برای تهیه مدل رفتاری شامل پارامترهای شناسایی و منحنیهای تنش - کرنش برای آزمایشهای تحکیم نیافته زهکشی نشده (UU) و تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) هستند که از آزمایشگاههای مکانیک خاک پی‌کاو، خاک آزما و شرکت مهندسی مشاور مه‌اب‌قدس تهیه شده است [۷ و ۸]. آزمایشها بر روی نمونه‌های بازسازی شده^۵ از منطقه سد کرخه در خوزستان و سد سیازخ در کردستان تهیه شده‌اند. آزمایشهای (UU) به صورت غیراشباع و با سرعت 0.7mm/min و آزمایشهای (CU) به صورت اشباع و با سرعت 0.05mm/min انجام شده‌اند. دامنه پارامترهای شناسایی و فیزیکی این خاکها در جدول (۱) و منحنیهای دانه‌بندی مصالح در شکل (۱) آمده است.

۳- معرفی شبکه عصبی مصنوعی

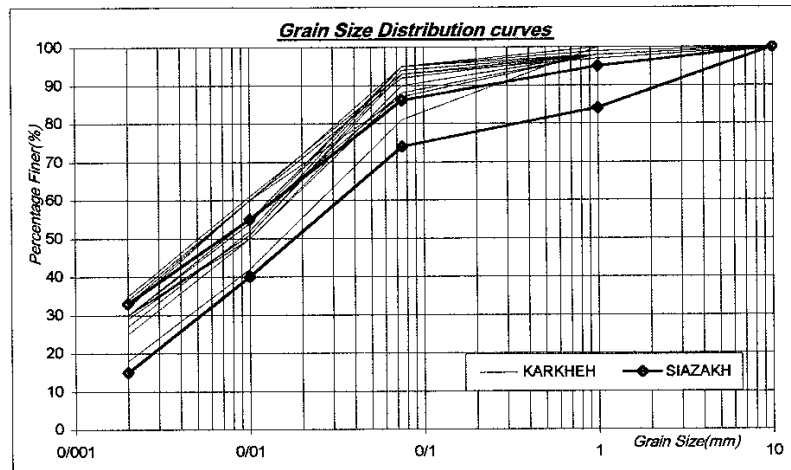
مطابق شکل (۲)، یک شبکه عصبی مصنوعی چندلایه با پیوند پیشرو^۶، از تعداد زیادی گره‌ها و پاره‌خطهای جهت‌دار که گره‌ها را به هم ارتباط می‌دهند تشکیل شده است [۴]. گره‌هایی که در لایه ورودی هستند نرونهای حسی^۷ و گره‌های لایه خروجی، نرونهای پاسخ دهنده^۸‌اند. بین نرونهای ورودی و خروجی نیز نرونهای پنهان^۹ قرار دارند. اطلاعات از طریق گره‌های ورودی به شبکه وارد می‌شوند، سپس از طریق اتصالات به لایه‌های پنهان منتقل شده و در نهایت خروجی شبکه از گره‌های لایه خروجی به دست می‌آید. این مراحل، مشابه شبکه عصبی بیولوژیکی انسان است. در واقع گره‌های شبکه مانند نرونها، ورودی و خروجی هر گره مانند دندریت‌ها و آکسونها و ارتباط بین دو گره مشابه سیناپس در شبکه اعصاب انسان است.

شبکه عصبی مصنوعی یک سیستم پردازشگر موازی جهت‌دار بوده و دارای خصوصیات و تعاریف زیر است

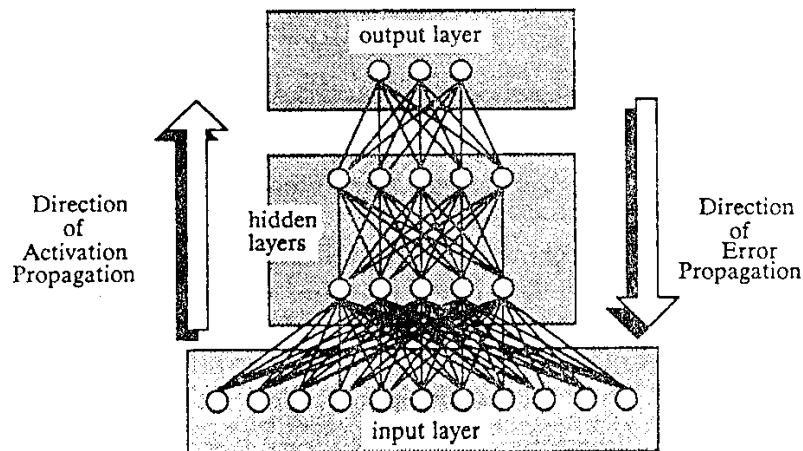
۱- گره‌های شبکه، پردازنده‌های عصبی هستند.

جدول ۱- دامنه پارامترهای فیزیکی در آزمایشهای سه محوری

محدوده	علامت و واحد	ورودی
۶۷-۹۵	D1 (%)	درصد کوچکتر از الک ۲۰۰
۱۸-۳۷	D2 (%)	درصد کوچکتر از ۲ میکرون
۴۶-۷۰	LL (%)	حد روانی
۲۰-۳۸	PI (%)	اندیس خمیری
۱۶-۲۸	W (%)	درصد رطوبت
(-۰/۱)-(-۰/۳۵)	LI	شاخص روانی
۱/۸-۲/۰۶	Dt (g/cm ³)	دانسیته تر
۰/۵۵-۰/۸	e ₀	نسبت تخلخل اولیه
۱-۹	P3 (kg/cm ³)	تنش همه جانبه



شکل ۱- منحنیهای دانه بندی مصالح آزمایش



شکل ۲- شکل عمومی یک شبکه عصبی مصنوعی [۱]

۲- اتصالات شبکه دارای وزن مخصوص به خود هستند که به صورت یک طرفه عمل می‌کنند و روی علائم عبوری تأثیر می‌گذارند. این وزنها میزان همکاری دو گره را نمایان می‌سازند.

۳- نرونها دارای حافظهٔ محلی هستند که وزن اتصالات مربوط به گذشته را در آن نگهداری می‌کنند.

۴- هر نرون دارای یک تابع انتقال (تحریک) است که از مقادیر ذخیره شده در حافظه محلی و سیگنال ورودی به نرون استفاده کرده و سیگنال خروجی نرون را محاسبه می‌کند.

۵- وزنه‌های اتصالات شبکه با توجه به قانون یادگیری در هر مرحله یادگیری تغییر می‌کنند.

عملکرد یک گره در شبکهٔ عصبی مطابق شکل (۳) به تصویر کشیده شده است. با توجه به این شکل، اطلاعات ورودی از طریق گره‌های قبل، در وزن مربوط ضرب شده و از طریق تابع شبکه^۱ وارد گرهٔ بعدی می‌شود. در شبکه‌های عصبی، این تابع معمولاً، یک تابع جمع‌کنندهٔ خطی است. سپس این مقدار، از تابع انتقال گره عبور کرده و به گره‌های لایه بعدی ارسال می‌شود.

تابع انتقال یا تحریک می‌تواند خطی (در لایه خروجی) یا غیرخطی (سیگموئید، تانژانت هیپربولیک و ...) باشد. در حقیقت رفتار غیرخطی با اعمال یک تابع انتقال غیرخطی مطلوب میسر می‌شود.

در ساخت یک مدل بر مبنای شبکهٔ عصبی، اولین کار انتخاب نوع شبکه و الگوریتم یادگیری آن است. پس از آن پارامترهای ورودی که در خروجی تأثیرگذارند انتخاب می‌شوند و سپس معماری شبکه (تعداد لایه‌ها، تعداد گره‌ها و چگونگی اتصال گره‌ها) و نوع توابع انتقال و شبکه تعیین می‌شوند.

بعد از تعیین نوع شبکه و معماری آن، در روشهای با یادگیری با سرپرست، یکسری اطلاعات ورودی - خروجی به شبکه داده می‌شود. شبکه براساس این اطلاعات آموزش می‌یابد، این مرحله، مرحلهٔ آموزش شبکه است. در مرحلهٔ

آموزش، با توجه به نوع الگوریتم یادگیری، وزنه‌های اتصالات شبکه تغییر می‌کند. با تغییر توابع انتقال در صورت لزوم و گره‌های هر لایه و عوامل مؤثر در یادگیری وزنها به صورت سعی و خطا، خروجی مطلوب به دست می‌آید (معمولاً یک شبکه سه لایه که شامل یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک لایه پنهان است برای تقریب توابع غیرخطی کفایت می‌کند.

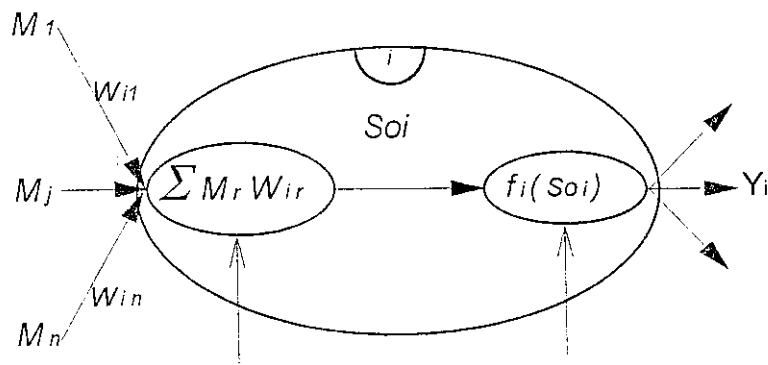
لذا، برای افزایش تعمیم‌دهی و همچنین دقت در یادگیری، گره‌های لایه پنهان بسیار تعیین‌کننده بوده که با تغییر آنها و بررسی نتایج شبیه‌سازی، تعداد مناسب آنها انتخاب می‌شود).

برای اطمینان از عملکرد مطلوب شبکه، از یکسری ورودی به عنوان اطلاعات آزمایشی استفاده می‌شود. این مرحله نیز آزمون شبکه نامیده می‌شود. بعد از تکمیل این مرحله و رفع نواقص موجود، شبکهٔ عصبی آماده استفاده خواهد بود.

معمولاً وزنه‌های اولیه در شبکه‌های عصبی به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. وزنه‌های مناسب اتصالات شبکه در مرحلهٔ آموزش شبکه تعیین می‌شوند به طوری که در نهایت بتوان با حفظ قدرت تعمیم‌دهی، به مقدار خطای حداقل در خروجی شبکه رسید. خطایی که در اینجا از آن صحبت می‌شود مجموع مربعات خطاها در لایه خروجی شبکه است.

در مدل تهیه شده، برای اصلاح وزنها، از قانون یادگیری پس انتشار خطا^{۱۱} استفاده شده است. مطابق این قانون در هر مرحله از آموزش شبکه، خطای خروجی شبکه محاسبه شده و از آن برای تغییر وزنه‌های شبکه استفاده می‌شود تا خطا حداقل شود. همچنین در قانون یادگیری از ضریب ممتد برای تسریع در همگرایی شبکه و خروج از بهینه‌های محلی استفاده شده که مقدار آن نیز با سعی و خطا به دست آمده است.

برای پیش بینی مدل رفتاری با استفاده از شبکهٔ عصبی مصنوعی از نرم افزار NWORKS استفاده شده است [۵]. در این نرم‌افزار، شبکه‌های عصبی مختلفی وجود دارند. در مدل‌سازی مورد نظر در این تحقیق از شبکهٔ عصبی مستقیم چند لایه استفاده شده است. قانون اصلاح وزن، همان قانون پس انتشار خطاست. اطلاعات مورد نیاز نرم‌افزار در دو قالب



شکل ۳- عملکرد گره i در شبکه عصبی

شکل ۳- عملکرد گره i در شبکه عصبی

۲۰۰ حداکثر ۱۰۰ درصد و عدد ۱ را به خود اختصاص می‌دهد)، این ورودیها همسان‌سازی می‌شوند. در قسمت ورودی شبکه، همسان‌سازی داده‌ها با تقسیم هر داده بر ماکزیمم همان داده در کلیه اطلاعات به دست می‌آید. به همین دلیل میزان دانه‌های عبوری از الک ۲۰۰، کوچکتر از دو میکرون، حد روانی، اندیس خمیری، درصد رطوبت و نسبت تخلخل اولیه به صورت درصد بیان شده و دانسیته مرطوب بر ۲/۵ و تنش همه‌جانبه بر ۱۰ تقسیم شده است، شاخص روانی نیز به همان صورت عادی استفاده شده است.

در خروجی شبکه تنشهای مربوط به کرنشهای ۱، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ درصد استفاده شده است. از آنجا که تابع انتقال شبکه، تابع سیگموئید است، خروجیها نیز بین ۰ و ۱ نگاشت شده‌اند. در شکل (۴)، S_i ها، تنشها در کرنشهای مشخص شده هستند. به عنوان مثال S_8 ، تنش در کرنش ۸ درصد است. تعداد داده‌های آموزشی ۴۳ عدد و تعداد داده‌های آزمایشی ۱۲ عدد هستند. برای یادگیری شبکه و رسیدن به خطای متوسط ۶ درصد در خروجی، آموزش شبکه تا ۱۰۰۰۰ بار ادامه یافت. روند تغییرات خطا در خروجی در شکل (۵) مشاهده می‌شود. همان طور که مشاهده می‌شود خطای شبکه با افزایش آموزش آن کاهش می‌یابد. تابع انتقال مورد استفاده به صورت سیگموئید $1/(1+e^{-2x})$ و همچنین ضریب یادگیری ۰/۹ و ضریب ممتنم ۰/۱ به دست آمدند. تعدادی از منحنیهای

آموزش و آزمایش ارائه می‌شود. اطلاعات آموزشی برای تعیین وزنها، توسط فایل ورودی به برنامه ارائه می‌شود. برنامه می‌تواند اطلاعات را به صورت اتفاقی و یا ترتیبی استفاده کند. حذف و اضافه کردن گره‌ها، اتصالها و لایه‌ها به راحتی توسط این نرم‌افزار انجام می‌گیرد. پس از آموزش شبکه و به حداقل رساندن خطای خروجی آن، اطلاعات آزمایشی برای بررسی قابلیت شبکه در مدلسازی آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

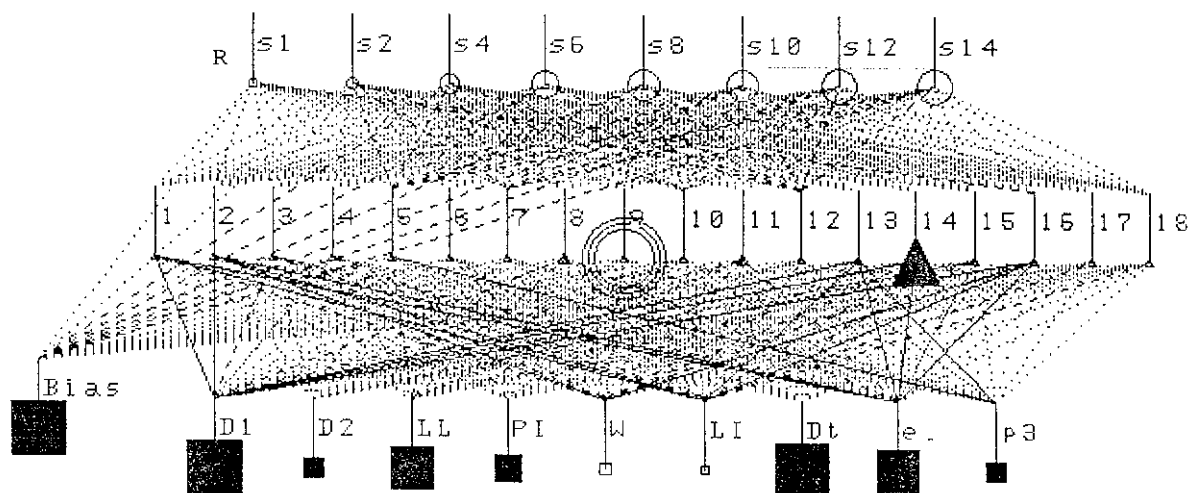
آنچه که در ادامه می‌آید شرح مختصری از تحقیقات انجام شده در ارتباط با مدلسازی رفتار خاکهای رسی است. برای بررسی بیشتر می‌توان از مرجع [۹] استفاده کرد.

۴- مدل شبکه عصبی برای آزمایشهای UU

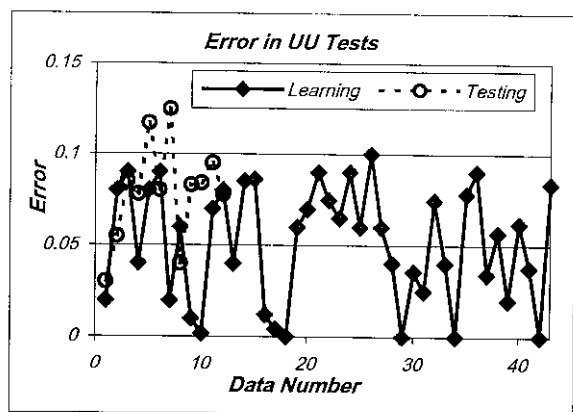
مطابق شکل (۴) برای پیش بینی منحنیهای تنش-کرنش در آزمایشهای UU، شبکه عصبی مستقیم سه لایه‌ای با تعداد ۹ ورودی و ۸ خروجی استفاده شده است. تعداد گره‌ها در لایه پنهان نیز با سعی و خطا به ۱۸ عدد رسید.

ورودیهای شبکه عبارت‌اند از: درصد دانه‌های کوچکتر از 0.075mm، درصد دانه‌های کوچکتر از دو میکرون، حد روانی، اندیس خمیری، درصد رطوبت، شاخص روانی، دانسیته تر، نسبت تخلخل اولیه و تنشهای همه‌جانبه.

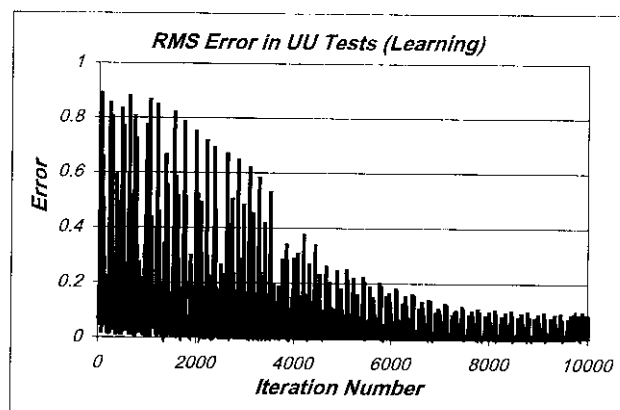
از آنجا که مقدار ورودیها با یکدیگر اختلاف زیادی دارند (مثلاً تنش همه‌جانبه تا عدد ۹ است، ولی درصد عبوری از الک



شکل ۴- نمای شبکه عصبی مورد استفاده در آزمایشهای تحکیم نشده زهکشی نشده



ب



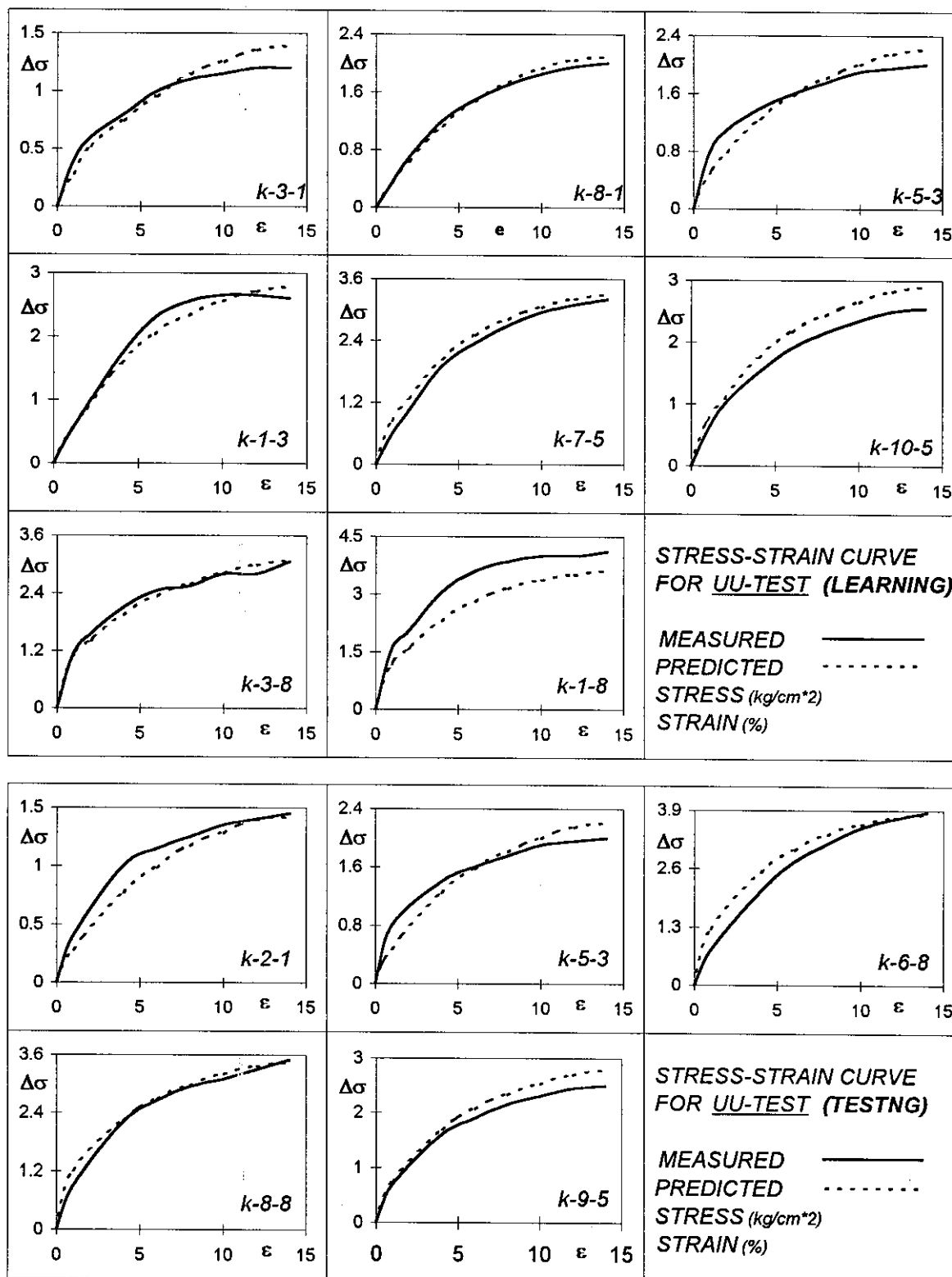
الف

شکل ۵- (الف) روند کاهش خطا با آموزش شبکه در آزمایش UU، (ب) مقایسه خطای داده‌های آزمایشی و آموزشی شبکه

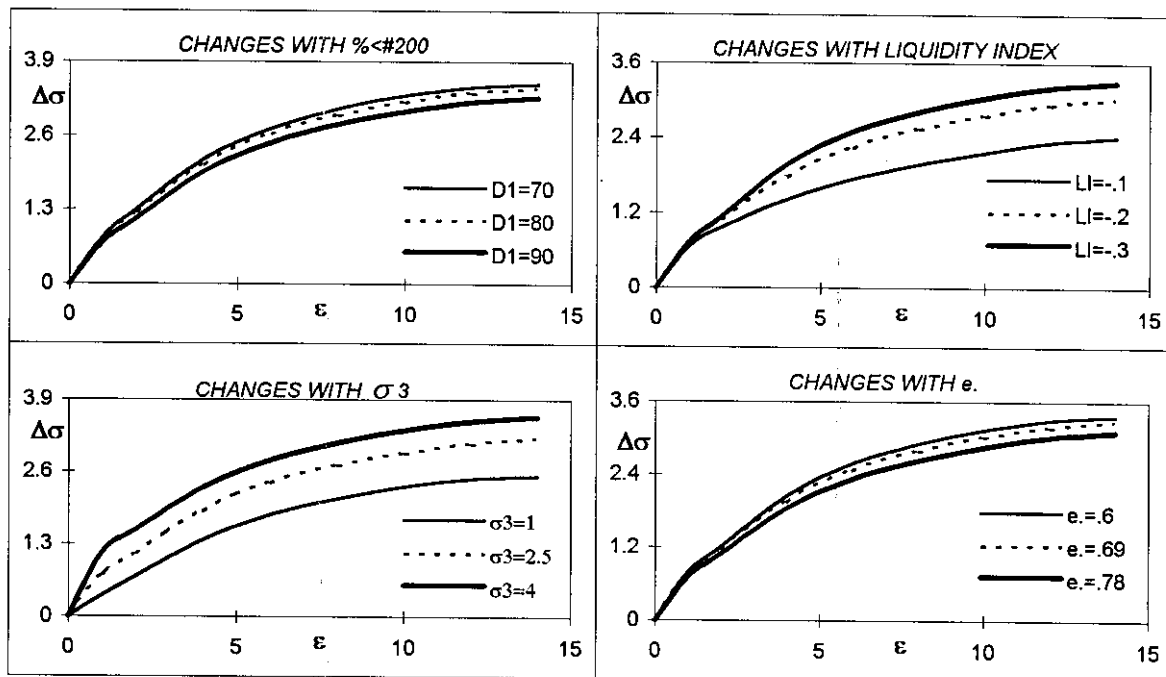
واقعی بیشتر بوده و در برخی دیگر تنش پیش بینی شده کمتر از آن است. ولی در کل هم در مرحله آموزش و هم در مرحله آزمایش، منحنیهای پیش بینی به منحنیهای واقعی نزدیک‌اند. در شکل (۵-ب) خطای نمونه‌های آزمایش و آموزش در نهایت مقایسه شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود خطای آزمایش بیشتر از آموزش است.

حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی بررسی شده است که در شکل (۷) مشاهده می‌شود. در این شکل LI, D1, σ_3 و e_0 به ترتیب درصد عبوری از الک ۲۰۰، شاخص روانی، تخلخل اولیه و تنش همه‌جانبه‌اند. در این شکلها تنشهای ارائه

تنش-کرنش در حالت‌های آموزش و آزمایش شبکه در شکل (۶) آمده است. در این منحنیها $\Delta\sigma$ اختلاف تنش قائم و تنش همه‌جانبه است. در نامگذاری منحنیها حرف اول، حرف ابتدای نام محل برداشت نمونه (کرخه یا سیازاخ)، عدد بعدی شماره گروه داده‌ها و عدد آخر تنش همه‌جانبه است. به عنوان مثال k-5-3 بیانگر نمونه‌ای از محل احداث سد کرخه، از گروه داده‌های پنجم با تنش همه‌جانبه ۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع است. همان طور که دیده می‌شود تطابق خوبی بین منحنیهای پیش بینی شده و منحنیهای واقعی وجود دارد. در برخی از منحنیها مقدار پیش بینی شده از مدل شبکه عصبی از منحنی



شکل ۶- منحنیهای تنش- کرنش در آزمایش UU برای چند نمونه از داده‌های آموزشی و آزمایشی



شکل ۷- اثر پارامترهای فیزیکی در منحنی تنش- کرنش در آزمایش UU

منحنیهای تنش-کرنش داشته‌اند. البته در این میان باید به نقش دامنه داده‌های ورودی در تحلیل حساسیت نیز توجه کرد. برخی از ورودیها مطابق جدول (۱) به ویژه وقتی نرمال می‌شوند دامنه محدودتری دارند.

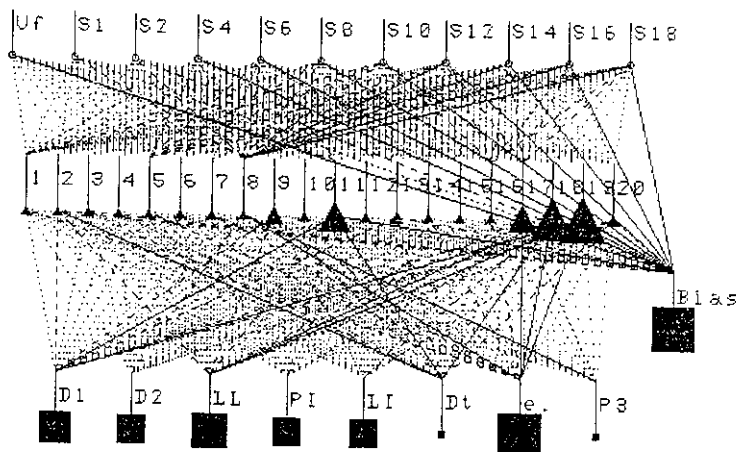
۵- مدل شبکه عصبی برای آزمایشهای CU

ورودیها و خروجیهای شبکه مانند آزمایشهای UU هستند با این تفاوت که در خروجی شبکه، تنشها در کرنشهای ۱۶ و ۱۸ درصد و همچنین فشار آب حفره‌ای در هنگام گسیختگی اضافه شدند. در این آزمایش، ورودیها و خروجیها با یک رابطه خطی بین ۰ و ۱ همسان شده‌اند. در نهایت، مطابق شکل (۸)، برای پیش بینی منحنیهای تنش-کرنش در آزمایشهای CU، شبکه عصبی مستقیم سه‌لایه‌ای به صورت $11 \times 20 \times 8$ استفاده شد. تعداد داده‌های آموزشی ۳۵ عدد و تعداد داده‌های آزمایشی ۸ عدد هستند. یادگیری تا رسیدن به خطای متوسط ۵ درصد تا ۶۰۰۰ بار آموزش ادامه یافته است. روند تغییرات خطا در خروجی در شکل (۹-الف) آمده است. در اینجا نیز خطای

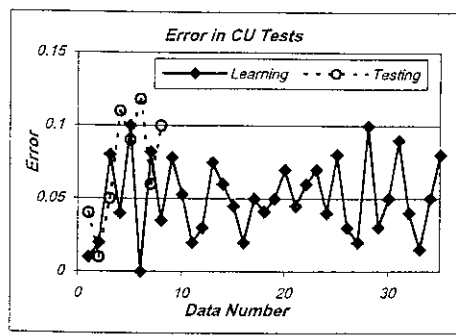
شده برحسب kg/cm^2 است. با مشاهده شکل (۷) ملاحظه می‌شود که افزایش درصد ریزدانه (رس و لای) باعث کاهش مقاومت برشی در آزمایشهای مورد نظر می‌شود.

با کاهش شاخص روانی، مقاومت برشی بیشتر می‌شود. از آنجا که هر چه شاخص روانی کاهش یابد نمونه پیش تحکیم یافته‌تر می‌شود (OCR بیشتر) مقاومت برشی بیشتری نیز خواهد داشت. با توجه به تعریف شاخص روانی، با افزایش رطوبت نمونه این شاخص افزایش می‌یابد (در تحلیل حساسیت نسبت به شاخص روانی حدود اثر برگ ثابت در نظر گرفته شده است). بنابراین با کاهش رطوبت نمونه مقاومت برشی افزایش می‌یابد و این امری بدیهی است.

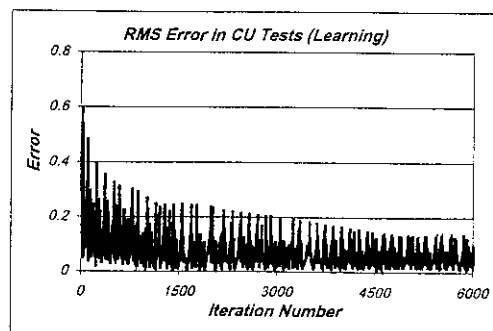
با افزایش نسبت تخلخل (کاهش دانسیته خاک)، مقاومت برشی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش تنش همه‌جانبه در نمونه‌ها نیز باعث افزایش مقاومت برشی در نمونه‌ها می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج حاصله از این پژوهش منطبق بر اصول مکانیک خاک است. لازم به ذکر است که تنش همه‌جانبه و شاخص روانی نمونه‌ها، بیشترین تأثیر را بر



شکل ۸- نمای شبکه عصبی مورد استفاده در آزمایشهای تحکیم یافته زهکشی نشده CU



ب



الف

شکل ۹- (الف) روند کاهش خطا با آموزش شبکه در آزمایش CU، (ب) مقایسه خطای داده‌های آزمایشی و آموزشی شبکه

منحنیهای تنش- کرنش، نسبت به پارامترهای ورودی، بررسی شده است که در شکل (۱۲) ارائه شده است. براساس این شکلها می‌توان موارد زیر را نتیجه‌گیری کرد

الف - با افزایش درصد ریزدانه و درصد دانه‌های کوچکتر از دو میکرون مقاومت برشی کاهش می‌یابد.

ب - افزایش حد روانی و اندیس خمیری باعث کاهش مقاومت برشی در آزمایشهای CU می‌شود.

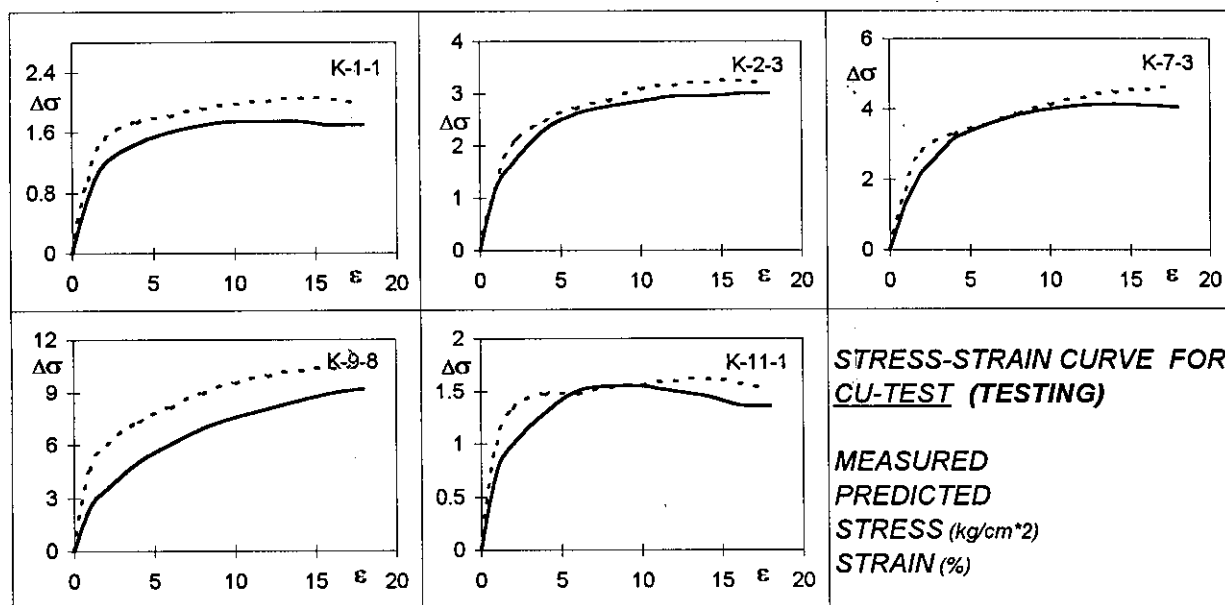
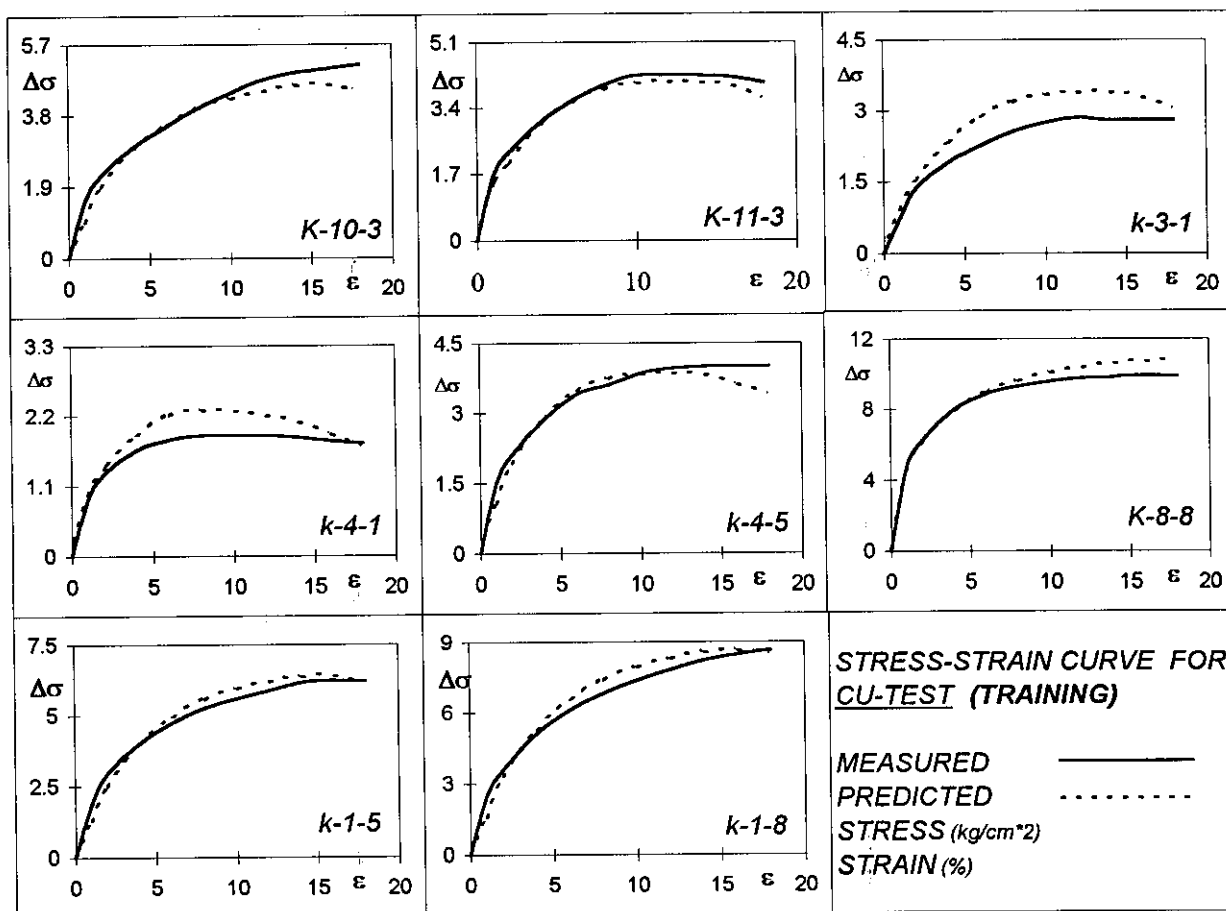
ج - با افزایش تنش همه‌جانبه، منحنی تنش-کرنش به سمت بالا حرکت می‌کند.

د - افزایش تخلخل اولیه و کاهش دانسیته مرطوب در نمونه‌ها باعث کاهش مقاومت برشی می‌شوند.

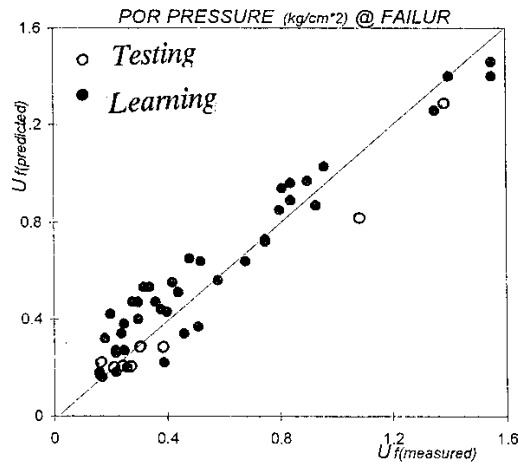
ه - افزایش پیش تحکیمی (کاهش شاخص روانی) باعث افزایش مقاومت برشی می‌شود.

شبکه با افزایش آموزش آن کاهش می‌یابد. تابع انتقال به صورت $1/(1+e^{-x})$ ، ضریب یادگیری ۰/۹ و ضریب ممتنم نیز به دست آمدند. برخی از منحنیهای تنش-کرنش به صورت آموزشی و آزمایشی در شکل (۱۰) آمده است. در اینجا نیز تطابق خوبی بین منحنیهای واقعی و پیش بینی شده مشاهده می‌شود. در شکل (۹-ب) نیز خطای آموزش و آزمایش شبکه پس از آموزش شبکه آمده‌اند. متوسط خطای داده‌های آزمایشی در این حالت نیز بیشتر از داده‌های آموزشی است.

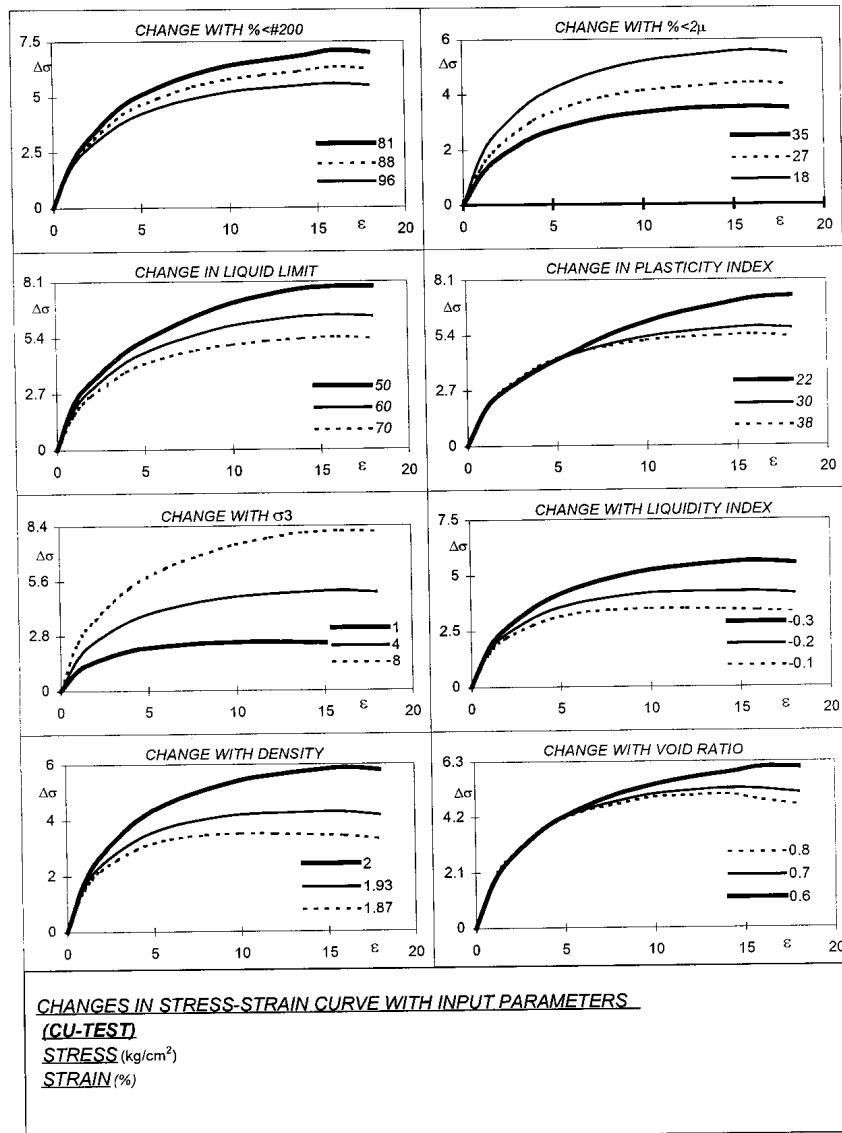
نمودار فشار آب حفره‌ای هنگام گسیختگی برای داده‌های آموزشی و آزمایشی در حالت پیش بینی نسبت به مقدار واقعی در شکل (۱۱) ارائه شده است. همان طور که دیده می‌شود، تراکم داده‌ها در اطراف خط با زاویه ۴۵ درجه است و این بیانگر صحت مدل تهیه شده است. در اینجا نیز تغییرات



شکل ۱۰- منحنیهای تنش-کرنش در آزمایش CU برای چند نمونه از داده‌های آموزشی و آزمایشی



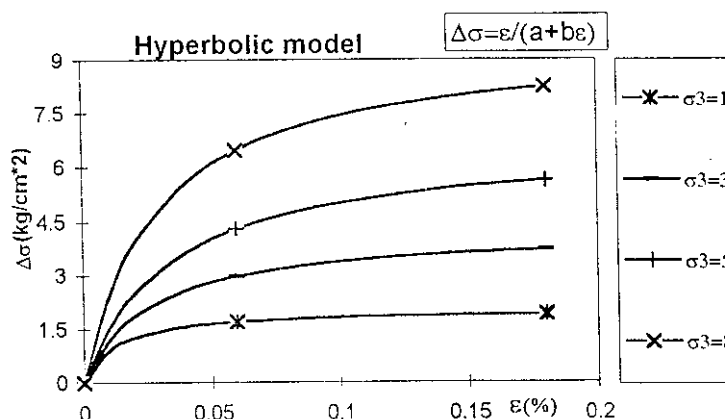
شکل ۱۱- مقایسه فشار آب حفره‌ای هنگام گسیختگی برای داده‌های آموزشی و آزمایشی



شکل ۱۲- اثر پارامترهای فیزیکی در منحنی تنش- کرنش در آزمایش CU

جدول ۲- مقایسه بین مدلها برای تخمین پارامترهای مقاومت برشی از آزمایشهای CU

C (kg/cm ²)	φ (درجه)	C (kg/cm ²)	φ (درجه)	
۰/۲۸	۲۰/۲	۰/۲۶	۲۲	واقعی
۰/۲۵	۱۹/۵			مدل هذلولی
۰/۲۵	۲۰	۰/۲۴	۲۰/۸	مدل شبکه عصبی



شکل ۱۳- منحنیهای تنش- کرنش در آزمایش CU توسط مدل هذلولی

مقاومت برشی به دست آمد که در جدول (۲) ارائه شده‌اند. مقادیر آزمایشگاهی پارامترهای مقاومت برشی نیز با توجه به پوش دایره‌های تنش کل و مؤثر از منحنیهای تنش-کرنش آزمایشگاهی به دست آمدند که در همین جدول ارائه شده‌اند. همان طور که از نتایج این جدول مشاهده می‌شود، مقادیر به دست آمده از مدل شبکه عصبی به مقادیر واقعی نزدیک است. البته در حالت تنش کل، مدل هیپربولیک نیز جوابهای مطلوبی ارائه کرده است.

۷- نتیجه گیری

همان طور که مشاهده شد شبکه‌های عصبی مصنوعی قابلیت پیش بینی و مدلسازی منحنیهای تنش-کرنش در خاکهای رسی را دارند. در مدل تهیه شده با تغییر پارامترهای ورودی، تغییرات مطلوبی در منحنیهای تنش-کرنش دیده می‌شود که این بیانگر صحت و درستی مدل شبکه عصبی است. از مزایای مدل تهیه شده این است که از پارامترهای فیزیکی و

کلیه نتایج به دست آمده با مشاهدات آزمایشگاهی تطابق دارد و در نتیجه روش به کار گرفته شده مناسب است.

۶- مقایسه پارامترهای مقاومت برشی از مدل

هذلولی و مدل شبکه عصبی در آزمایشهای CU

مدل هذلولی برای تنشهای همه‌جانبه ۱، ۳، ۵ و ۸ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، برای داده‌های منطقه سد کرخه تهیه شد که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود. با رسم دایره‌های موهر و پوش آنها، پارامترهای مقاومت برشی در حالت تنش کل با استفاده از این مدل به دست آمدند که در جدول (۲) مشاهده می‌شود. برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی در حالت تنش کل و تنش مؤثر با استفاده از مدل شبکه عصبی، متوسط ورودیهای منطقه سد کرخه به مدل شبکه عصبی ارائه شد و منحنیهای تنش-کرنش متوسط برای محل سد کرخه و همچنین فشار آب حفره‌ای هنگام گسیختگی به دست آمد. در نهایت نیز با رسم دایره‌های موهر در حالت تنش مؤثر و تنش کل، پارامترهای

جدول ۳- ورودیهای آموزشی شبکه برای آزمایشهای UU

INPUTS FOR NWORKS (UU-TEST) TRAINING									
No.	% < #200	% < 2 μ	LL(%)	PI(%)	W(%)	LI	γ (g/cm ³)	e.	σ_3 (kg/cm ²)
k-1-3	95	35	68	33	26.7	-0.25	1.89	0.74	3
k-1-5	95	35	68	33	26.7	-0.25	1.89	0.74	5
k-1-8	95	35	68	33	26.7	-0.25	1.89	0.74	8
k-2-3	95	30	70	38	27.4	-0.12	1.89	0.78	3
k-2-5	95	30	70	38	27.4	-0.12	1.89	0.78	5
k-3-1	92	29	66	33	28	-0.15	1.88	0.8	1
k-3-3	92	29	66	33	28	-0.15	1.88	0.8	3
k-3-8	92	29	66	33	28	-0.15	1.88	0.8	8
k-4-1	96	28	58	30	21.9	-0.2	1.96	0.66	1
k-4-3	96	28	58	30	21.6	-0.21	1.95	0.66	3
k-4-5	96	28	58	30	21.6	-0.21	1.95	0.66	5
k-4-8	96	28	58	30	21.2	-0.23	1.94	0.66	8
k-5-3	95	30	57	30	22	-0.17	1.9	0.68	3
k-5-5	95	30	57	30	22	-0.17	1.9	0.68	5
k-5-8	95	30	57	30	22	-0.17	1.9	0.68	8
k-6-1	87	33	63	30	23.9	-0.3	1.91	0.66	1
k-6-3	87	33	63	30	23.9	-0.3	1.91	0.66	3
k-6-5	87	33	63	30	23.4	-0.32	1.91	0.66	5
k-7-1	81	18	48	22	20.5	-0.25	2	0.57	1
k-7-3	81	18	48	22	20.7	-0.24	2	0.57	3
k-7-5	81	18	48	22	20.7	-0.24	2	0.57	5
k-7-8	81	18	48	22	20.7	-0.24	2	0.57	8
k-8-1	89	30	63	38	21.6	-0.09	1.97	0.62	1
k-8-3	89	30	63	38	21.3	-0.1	1.96	0.62	3
k-8-5	89	30	63	38	21.1	-0.1	1.97	0.62	5
k-9-1	90	25	54	27	22.8	-0.16	1.94	0.62	1
k-9-3	90	25	54	27	22.8	-0.16	1.94	0.62	3
k-10-1	92	34	50	22	22.4	-0.25	1.93	0.68	1
k-10-3	92	34	50	22	22.4	-0.25	1.93	0.68	3
k-10-5	92	34	50	22	22.4	-0.25	1.93	0.68	5
k-10-8	92	34	50	22	22.4	-0.25	1.93	0.68	8
k-11-1	92	33	65	38	20.7	-0.17	1.94	0.62	1
k-11-5	92	33	65	38	20.7	-0.17	1.94	0.62	5
k-11-8	92	33	65	38	20.7	-0.17	1.94	0.62	8
k-12-1	94	30	54	27	23.7	-0.12	1.95	0.67	1
k-12-3	94	30	54	27	23.5	-0.13	1.95	0.67	3
k-12-5	94	30	54	27	23.2	-0.14	1.94	0.67	5
k-12-8	94	30	54	27	22.3	-0.17	1.93	0.67	8
S-7-3	67	30	51	26	15.8	-0.35	1.97	0.57	3
S-7-6	67	30	51	26	15.8	-0.35	1.97	0.57	6
S-7-9	67	30	51	26	15.8	-0.35	1.97	0.57	9
S-8-3	77	37	46	24	17	-0.21	2	0.55	3
S-8-9	77	37	46	24	17	-0.21	2	0.55	9

جدول ۴- تنشهای اندازه‌گیری شده برای آموزش شبکه در آزمایش UU

Stress(kg/cm ²) For Learning Data(UU-test) -measured									
No.	ε	1	2	4	6	8	10	12	14
k-1-3	0.5	0.9	1.7	2.3	2.55	2.65	2.65	2.65	2.6
k-1-5	0.75	1.2	1.95	2.5	2.8	3	3.2	3.2	3.2
k-1-8	1.6	2.05	3.05	3.6	3.85	4	4	4	4.1
k-2-3	0.7	1	1.35	1.6	1.8	1.9	2	2	2.1
k-2-5	0.8	1.1	1.5	1.85	2	2.2	2.35	2.35	2.45
k-3-1	0.4	0.6	0.8	1	1.1	1.15	1.2	1.2	1.2
k-3-3	0.55	0.8	1.15	1.35	1.45	1.55	1.6	1.6	1.65
k-3-8	1.15	1.55	2.1	2.45	2.55	2.8	2.8	2.8	3.05
k-4-1	0.35	0.6	1.1	1.5	1.75	1.85	1.9	1.9	2.05
k-4-3	0.7	1.15	1.6	1.85	2.05	2.2	2.4	2.4	2.5
k-4-5	1.2	1.8	2.3	2.6	2.75	2.85	2.9	2.9	3
k-4-8	1.7	2.25	2.8	3.1	3.3	3.4	3.5	3.5	3.6
k-5-3	0.8	1.1	1.4	1.6	1.75	1.9	1.95	1.95	2
k-5-5	1.35	1.75	2.2	2.5	2.75	2.9	3.05	3.05	3.1
k-5-8	1.5	1.9	2.3	2.6	2.8	2.95	3.1	3.1	3.2
k-6-1	0.25	0.6	1.3	1.75	2.05	2.25	2.3	2.3	2.3
k-6-3	0.45	0.75	1.35	1.8	2.15	2.45	2.55	2.55	2.65
k-6-5	0.6	1	1.75	2.2	2.5	2.7	2.85	2.85	2.9
k-7-1	0.45	0.8	1.35	1.8	2.05	2.25	2.4	2.4	2.45
k-7-3	0.6	1.05	1.8	2.25	2.5	2.65	2.85	2.85	2.9
k-7-5	0.6	1.05	1.9	2.35	2.7	2.95	3.1	3.1	3.2
k-7-8	0.85	1.3	2	2.55	3	3.3	3.5	3.5	3.65
k-8-1	0.35	0.7	1.2	1.5	1.7	1.85	1.95	1.95	2
k-8-3	0.4	1	1.65	2	2.25	2.45	2.6	2.6	2.6
k-8-5	0.75	1.3	2	2.4	2.6	2.75	2.9	2.9	3
k-9-1	0.5	0.65	0.8	1	1.2	1.25	1.5	1.5	1.45
k-9-3	0.6	0.9	1.3	1.6	1.8	1.9	2	2	2.1
k-10-1	0.35	0.65	1.1	1.4	1.65	1.7	1.7	1.7	1.65
k-10-3	0.55	0.85	1.35	1.65	1.9	2.05	2.1	2.1	2.15
k-10-5	0.6	1	1.5	1.9	2.15	2.35	2.5	2.5	2.55
k-10-8	2.75	1.1	1.7	2.15	2.35	2.5	2.65	2.65	2.75
k-11-1	0.35	0.65	1.2	1.5	1.7	1.85	1.8	1.8	2
k-11-5	0.6	1.2	2.25	2.75	3.05	3.15	3.2	3.2	3.3
k-11-8	0.65	1.4	2.25	2.85	3.2	3.5	3.7	3.7	3.75
k-12-1	0.2	0.35	0.55	0.7	0.85	0.9	0.95	0.95	0.95
k-12-3	0.3	0.5	0.75	0.95	1.1	1.2	1.3	1.3	1.3
k-12-5	0.35	0.55	0.9	1.15	1.3	1.4	1.45	1.45	1.55
k-12-8	0.05	0.7	1.05	1.25	1.4	1.55	1.65	1.65	1.7
S-7-3	0.65	1.1	1.65	2.1	2.4	2.6	2.7	2.7	2.65
S-7-6	0.9	1.45	2.3	2.65	2.9	3.1	3.15	3.15	3.15
S-7-9	1.45	1.95	2.45	2.85	3.15	3.35	3.45	3.45	3.45
S-8-3	0.85	1.35	1.75	2	2.15	2.3	2.35	2.35	2.35
S-8-9	1.2	1.65	2.15	2.4	2.6	2.7	2.75	2.75	2.75

جدول ۵- ورودی شبکه عصبی برای آزمایش شبکه در آزمایشهای UU

INPUTS FOR NWORKS (UU-TEST) TESTING									
No.	% < #200	% < 2 μ	LL(%)	PI(%)	W(%)	LI	γ (g/cm ³)	e.	σ_3 (kg/cm ²)
k-1-1	95	35	68	33	26.7	-0.25	1.89	0.74	1
k-2-1	95	30	70	38	27.4	-0.12	1.89	0.78	1
k-2-8	95	30	70	38	27.4	-0.12	1.89	0.78	8
k-3-5	92	29	66	33	28	-0.15	1.88	0.8	5
k-5-3	95	30	57	30	22	-0.17	1.9	0.68	3
k-6-8	87	33	63	30	23.4	-0.32	1.91	0.66	8
k-7-1	81	18	48	22	20.5	-0.25	2	0.57	1
k-8-8	89	30	63	38	21.4	-0.09	1.94	0.62	8
k-9-5	90	25	54	27	22.8	-0.16	1.94	0.62	5
k-9-8	90	25	54	27	22.8	-0.16	1.94	0.62	8
k-11-3	92	33	65	38	20.7	-0.17	1.94	0.62	3
S-8-6	77	37	46	24	17	-0.21	2	0.55	6

جدول ۶- تنشهای اندازه‌گیری شده برای آزمون شبکه در آزمایش UU

Stress(kg/cm ²) For Testing Data(UU-test) -measured									
No.	ϵ	1	2	4	6	8	10	12	14
k-1-1		0.4	0.75	1.4	1.7	1.8	1.85	1.8	1.75
k-2-1		0.4	0.65	1	1.15	1.25	1.35	1.4	1.45
k-2-8		0.95	1.4	1.7	2.05	2.2	2.4	2.55	2.65
k-3-5		0.9	1.2	1.5	1.75	1.85	1.95	2	2.05
k-5-3		0.8	1.1	1.4	1.6	1.75	1.9	1.95	2
k-6-8		0.8	1.35	2.1	2.75	3.15	3.5	3.7	3.85
k-7-1		0.45	0.8	1.35	1.8	2.05	2.25	2.4	2.5
k-8-8		0.9	1.5	2.2	2.65	2.95	3.1	3.3	3.5
k-9-5		0.7	1.05	1.6	1.9	2.15	2.3	2.45	2.5
k-9-8		1	1.45	2.05	2.25	2.55	2.95	3.05	3.1
k-11-3		0.4	0.85	1.5	1.85	2.05	2.25	2.4	2.5
S-8-6		1	1.5	1.95	2.2	2.4	2.5	2.55	2.55

۸- قدردانی

این تحقیق در دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف انجام شده و از شرکتهای مهندسی مشاور مهابدقدس، خاک آزما و شرکت پی‌کاو، به دلیل همکاریهایی که در تهیه اطلاعات آزمایشگاهی داشتند تشکر می‌شود.

شناسایی برای پیش بینی رفتار مصالح استفاده شده است. همچنین با استفاده از شبکه‌های عصبی می‌توان پارامترهای مقاومت برشی در آزمایشهای CU را در حالت تنش کل و تنش مؤثر با نتایج آزمایشهای ساده فیزیکی تخمین زد. شبکه عصبی مصنوعی قابلیت پیش بینی پارامترهای دیگر طراحی را هم دارد به شرط آنکه شبکه‌ای ساخته شود که برای پارامتر مورد نظر آموزش یابد.

جدول ۷- ورودی مشخصات فیزیکی برای آموزش شبکه مربوط به آزمایشهای CU

INPUTS FOR NWORKS (CU-TEST) TRAINING								
No.	% < #200	% < 2 μ	LL(%)	Pl(%)	LI	γ (g/cm ³)	e.	σ_3 (kg/cm ²)
k-1-3	95	35	68	33	-0.258	1.88	0.74	3
k-1-5	95	35	68	33	-0.258	1.88	0.74	5
k-1-8	95	35	68	33	-0.258	1.88	0.74	8
k-2-1	95	30	70	38	-0.121	1.89	0.78	1
k-2-5	95	30	70	38	-0.121	1.89	0.78	5
k-2-8	95	30	70	38	-0.121	1.89	0.78	8
k-3-1	92	29	66	33	-0.152	1.87	0.80	1
k-3-8	92	29	66	33	-0.152	1.87	0.80	3
k-4-1	58	28	58	30	-0.200	1.96	0.66	1
k-4-3	58	28	58	30	-0.200	1.95	0.66	3
k-4-5	58	28	58	30	-0.200	1.95	0.66	5
k-5-1	95	30	57	30	-0.167	1.90	0.68	1
k-5-3	95	30	57	30	-0.167	1.90	0.68	3
k-5-5	95	30	57	30	-0.167	1.90	0.68	5
k-5-8	95	30	57	30	-0.167	1.90	0.68	8
k-6-3	87	33	63	30	-0.300	1.90	0.66	3
k-6-5	87	33	63	30	-0.300	1.91	0.66	5
k-7-1	81	18	48	22	-0.273	2.00	0.57	1
k-7-5	81	18	48	22	-0.273	2.00	0.57	5
k-7-8	81	18	48	22	-0.273	2.00	0.57	8
k-8-1	89	30	63	38	-0.089	1.97	0.62	1
k-8-3	89	30	63	38	-0.097	1.96	0.62	3
k-8-8	89	30	63	38	-0.095	1.94	0.62	8
k-9-1	90	25	54	27	-0.156	1.94	0.62	1
k-9-3	90	25	54	27	-0.156	1.94	0.62	3
k-9-5	90	25	54	27	-0.156	1.94	0.62	5
k-10-1	92	34	50	22	-0.255	1.93	0.68	1
k-10-3	92	34	50	22	-0.255	1.93	0.68	3
k-10-5	92	34	50	22	-0.255	1.93	0.68	5
k-10-8	92	34	50	22	-0.255	1.93	0.68	8
k-11-3	92	33	65	38	-0.166	1.94	0.62	3
k-11-5	92	33	65	38	-0.166	1.94	0.62	5
k-11-8	92	33	65	38	-0.166	1.94	0.62	8
k-12-1	94	30	54	27	-0.122	1.95	0.67	1
k-12-5	94	30	54	27	-0.141	1.94	0.67	5

جدول ۸- تنشهای اندازه‌گیری شده برای آموزش شبکه در آزمایش CU

STRESS(kg/cm ²) FOR TRAINING DATA (CU-test)- measured											
No.	Uf	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18
k-1-3	0.3	1.25	1.8	2.5	2.9	3.15	3.25	3.4	3.45	3.4	3.3
k-1-5	0.44	1.85	2.95	4	4.74	5.25	5.59	5.85	6.15	6.25	6.2
k-1-8	0.68	2.5	3.6	5.1	6.1	6.8	7.36	7.8	8.21	8.45	8.65
k-2-1	0.14	0.7	1.15	1.7	1.9	1.95	2	2	1.95	1.9	1.85
k-2-5	0.34	1.45	2.1	2.85	3.35	3.75	3.96	4.04	4.24	5	5
k-2-8	0.48	2.14	3.3	4.86	5.66	6.2	6.6	6.85	7.05	7.15	7.2
k-3-1	0.26	0.75	1.36	1.9	2.26	2.55	2.75	2.85	2.8	2.8	2.8
k-3-8	0.39	1.75	2.5	3.35	4.1	4.65	5.1	5.45	5.71	5.8	5.8
k-4-1	0.2	0.88	1.29	1.66	1.82	1.89	1.89	1.89	1.86	1.8	1.76
k-4-3	0.36	1.12	1.75	2.26	2.58	2.77	2.88	2.99	3.02	3.02	2.99
k-4-5	0.42	1.5	2.12	2.86	3.4	3.6	3.84	3.96	4	4	4
k-5-1	0.24	0.6	1	1.45	1.55	1.6	1.6	1.6	1.65	1.65	1.6
k-5-3	0.46	0.9	1.5	2.05	2.3	2.45	2.55	2.7	2.75	2.8	2.8
k-5-5	0.58	1.75	2.7	4	4.6	5	5.3	5.5	5.71	5.75	5.75
k-5-8	0.84	2.5	4	5.75	6.7	7.36	7.85	8.1	8.26	8.3	8.3
k-6-3	0.3	1.29	2.14	3.15	3.65	3.96	4.05	4.05	4	3.89	3.8
k-6-5	0.52	1.95	2.9	4.05	4.74	5.2	5.5	5.59	5.66	5.66	5.05
k-7-1	0.22	0.7	1.15	1.7	2	2.1	2.19	2.26	2.26	2.3	2.26
k-7-5	0.38	1.85	3.04	4.5	5.25	5.75	6	6.15	6.2	6.2	6.2
k-7-8	0.84	2.75	4.2	6.15	7.5	8.6	9.45	10	10.5	10.6	10.65
k-8-1	0.18	1	1.36	1.75	1.95	2.02	2.05	2.07	2.05	2.02	2
k-8-3	0.75	2.3	3.11	4.15	4.69	4.95	5	5.05	5.1	5.05	5
k-8-8	1.5	4.74	6.25	8	8.85	9.3	9.6	9.75	9.84	9.96	9.89
k-9-1	0.16	0.6	1	1.29	1.41	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.41
k-9-3	0.22	0.8	1	1.85	2.19	2.4	2.5	2.6	2.7	2.75	2.8
k-9-5	0.28	2.26	3.5	5.05	5.75	6.05	6.25	6.35	6.4	6.37	6.3
k-10-1	0.18	0.6	0.9	1.29	1.5	1.75	1.9	2	2.05	2.19	2.26
k-10-3	0.22	1.5	2.19	2.95	3.5	4	4.4	4.74	4.95	5.05	5.15
k-10-5	0.25	2	2.8	4.05	5.1	6	6.65	7.05	7.41	7.65	7.75
k-10-8	0.28	4	5	6.56	8	9.15	10.1	10.81	11.3	11.59	11.85
k-11-3	0.45	1.65	2.26	3.04	3.6	4	4.25	4.25	4.25	4.2	4.05
k-11-5	0.96	2.1	2.75	3.55	4.1	4.55	5	5.25	5.45	5.66	5.75
k-11-8	1.27	4.5	6.05	8	9.3	10.2	11	11.3	11.59	11.7	11.85
k-12-1	0.16	0.6	0.95	1.44	1.76	1.9	1.94	1.92	1.89	1.84	1.8
k-12-5	0.7	1.41	2.19	3.15	3.64	4	4.24	4.44	4.6	4.65	4.6

جدول ۹- ورودیهای آزمایشی هماهنگ شده برای آزمایشهای CU

NORMALIZED INPUTS FOR NWORKS (CU-TEST) TESTING								
No.	< #200	< 2μ	LL	PI	LI	γ	e.	σ3
K-1-1	0.933	1	0.909	0.688	0.199	0.077	0.739	0
K-2-3	0.933	0.706	1	1	0.848	0.154	0.913	0.286
K-6-1	0.4	0.882	0.682	0.5	0	0.308	0.391	0
K-7-3	0	0	0	0	0.128	1	0	0.286
K-8-5	0.533	0.706	0.682	1	0.934	0.769	0.217	0.571
K-9-8	0.6	0.412	0.273	0.313	0.682	0.538	0.217	1
K-11-1	0.733	0.882	0.773	1	0.635	0.538	0.217	0
K-12-3	0.867	0.706	0.273	0.313	0.806	0.615	0.435	0.286

جدول ۱۰- تنشهای اندازه گیری شده برای آزمایشهای CU (آزمایش شبکه)

stress(kg/cm ²) for testing data (CU-test)- measured											
no	Uf (%)	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18
k-1-1	0.20	0.75	1.18	1.45	1.60	1.70	1.75	1.75	1.75	1.70	1.70
k-2-3	0.28	1.20	1.65	2.30	2.60	2.75	2.85	2.95	2.95	2.99	2.99
k-6-1	0.24	0.60	1.00	1.55	1.85	2.00	2.00	2.00	2.00	1.95	1.94
k-7-3	0.28	1.36	2.19	3.15	3.55	3.84	4.00	4.10	4.15	4.10	4.0
k-8-5	1.14	3.50	4.50	6.05	6.95	7.50	7.95	8.26	8.35	8.35	8.3
k-9-8	0.40	2.50	3.50	5.00	6.05	6.95	7.55	8.05	8.50	8.95	9.20
k-11-1	0.17	0.75	1.00	1.29	1.50	1.55	1.55	1.50	1.45	1.37	1.36
k-12-3	0.38	0.84	1.36	2.00	2.44	2.75	2.92	3.04	3.15	3.20	3.15

واژه نامه

- | | | |
|------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| 1. artificial neural network | 5. remolded | 9. hidden |
| 2. Penumadu | 6. feed forward | 10. net |
| 3. Ellis | 7. sensory | 11. back propagation learning |
| 4. multi layer perceptron | 8. responding | |

مراجع

- Ghabussi, J., Garret, J. H., and Wu, X., "Knowledge-Based Modeling of Material Behavior with Neural Networks," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 117, No. 1, pp.132-153, 1991.
- Penumadu, D., Jin-Nan, L., Lchameau, J., and Armugam, S., "Rate Dependent Behaviour of Clays Using Neural Networks," *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, India, Vol. 4, pp. 1445-1448, 1994.
- Ellis, W., Yao, C., Zhao, R., and Penumadu, D., "Strees-Strain Modeling of Sands Using Artificial Neural Networks," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No. 5, pp. 429-435, 1995.
- Kung, S. Y., *Digital Neural Networks*, Prentice Hall, 1993.
- Klimasauskas, C., Guiver, J., and Pelton, G., *Neural Works Professional II and Neural Works Explorer*, Vol. 2, User's Guide, 1989.
- Das, B. M., *Advanced Soil Mechanics*, Mc Graw-Hill, 1990.
- شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، طرح مطالعات سد مخزنی کرخه، منابع قرضه و مصالح ساختمانی، بخش اول، ۱۳۷۷.
- شرکت مهندسی مشاور پی کاو، آزمایشهای مصالح ساختمانی و منابع قرضه سد سیازاخ، ۱۳۷۶.
- مهین روستا، ر.، "پیش بینی رفتار تنش-کرنش خاکهای رسی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی"، پایان نامه کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، به راهنمایی دکتر سیدمحسن حائری و دکتر ناصر ساداتی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده عمران، شهریور ۱۳۷۷.